

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 27 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13976

研究課題名(和文)フレキシブル基板上の異種材料デバイス混載技術に関する研究

研究課題名(英文)Study on Hetero Integration Technology of Devices on Flexible Substrate

研究代表者

東 清一郎(Higashi, Seiichiro)

広島大学・先端物質科学研究科・教授

研究者番号：30363047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：メニスカス力を利用して単結晶シリコン層をポリエチレンテレフタレート(PET)基板へ転写する技術に関して、単結晶シリコン層をPET基板へ転写した後の低温熱処理により界面にSi-O-C結合が形成されることにより高い密着性が得られることが分かった。中空構造で単結晶シリコン層を保持しているSiO₂柱の形状がイオン注入法によりテーパ形状に制御できることが分かり、単結晶シリコン層とSiO₂柱の界面部分から分離する理想的な分離により99%以上の歩留まり達成した。PET基板上に転写した単結晶シリコンを用いてNMOSインバータによる明瞭な反転信号を3MHzの動作周波数で得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：On the development of single-crystalline silicon layer transfer technology to PET substrate, following results became clear; 1) single-crystalline layer on PET forms Si-O-C bonds by low temperature anneal, which gives strong attachment, 2) SiO₂ pillar can be formed in tapered shape by ion implantation to BOX layer, which make the separation possible between SOI/BOX layer interface, 3) NMOS inverters fabricated on PET are operated at 3MHz on the basis of present layer transfer technology.

研究分野：半導体工学

キーワード：フレキシブルエレクトロニクス 転写技術

1. 研究開始当初の背景

フレキシブルエレクトロニクスは目覚ましい発展を遂げており、メリルリンチは2011年に40億ドルであった市場が2017年には350億ドルに急成長すると予想している。有機物や酸化物半導体をベースにした当該技術は液相プロセスや印刷等の低コスト製造技術を進めとし、トランジスタ、メモリ、発光デバイス、発電デバイスといったキーコンポーネントの実現に成功している。反面、デバイスの低い電流駆動能力、高い動作電圧、CMOS化および低消費電力化の困難性、更にデバイス動作時の信頼性の難点から、一大市場を形成しうるアプリケーションが見出されていないのも事実である。単結晶シリコン CMOS デバイスをフレキシブル基板上に作製可能な技術が確立されれば飛躍的な高機能化を実現できると共に、それぞれの材料が有する強みを同一基板上に集積化する、「異種材料デバイス混載フレキシブルエレクトロニクス」というユニークな分野形成が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、申請者らが独自に開発した MLT (Meniscus Force mediated Layer Transfer) 技術を更に発展させるため転写メカニズム解明に注力し、得られた知見に基づく高効率転写技術確立を第一の目的とする。

3. 研究の方法

メニスカス力による表面近接と近接表面間の相互作用に対して、理論・実験の両面からアプローチし、より高歩留りの転写、より高い密着性を確保するための指針を得る。この知見に基づいて2年目以降は n 型および p 型 MOS トランジスタのパターン設計およびプロセス構築をおこない、PET 基板上でのトランジスタ動作を達成する。

4. 研究成果

PET 上に転写した単結晶シリコンチャンネルパターンは、110 以上の熱処理後でテープ試験でも PET 基板から剥離することなく良好な密着を得ることができた。このような高い密着性が得られる理由を探るため、FTIR-ATR 法により単結晶シリコン/PET 界面の化学結合状態の調査をおこなった結果、Si-O-C 結合に起因する吸収ピークの増大が確認された。シリコン表面のシリコン-OH および PET 表面の

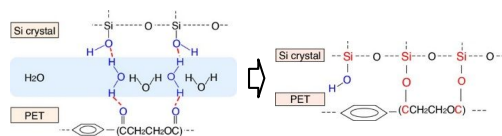


図1. シリコン表面と PET の水を介した反応による Si-O-C 結合形成の模式図。

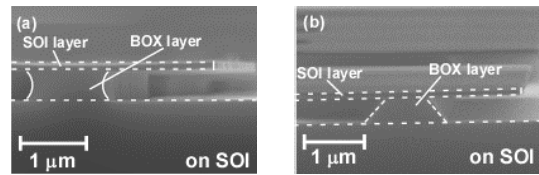


図2. BOX 層のウエットエッチングにより作製した中空構造の SEM 像。(a) イオン注入なしで等方性エッチングの場合、(b) イオン注入によりピラー形状制御した場合。

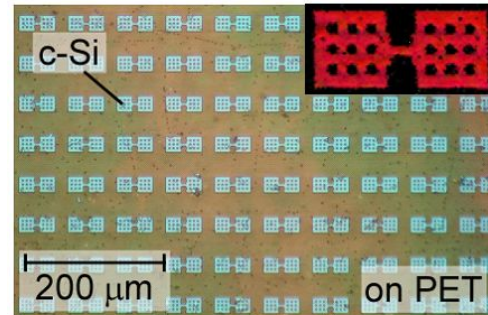


図3. PET 上に転写した単結晶シリコン層の光学顕微鏡写真と EBSD 面方位マップ。

C=O 結合に水を介した脱水縮合反応が進行することでシリコン-O-C 結合が形成され、これが高い密着性を与えているものと考えられる。

単結晶シリコン中空構造作製に関して、イオン注入による BOX 層のエッチングレート制御により図 2 (a) に示す従来の等方性エッチングによる SiO₂ ピラー形状を同図 (b) に示すテーパ側面を持つ錐台状の SiO₂ ピラー形成に成功し、SOI 層/BOX 層界面での分離が可能となった。この結果、99% 程度の歩留まりが安定的に得られるようになった (図 3)。

PET 上に作製した MOSFET の Id-Vg および Id-Vd 特性を図 4 に示す。構築したプロセスによりプラスチック上で高性能の CMOSFT 動作に成功した。

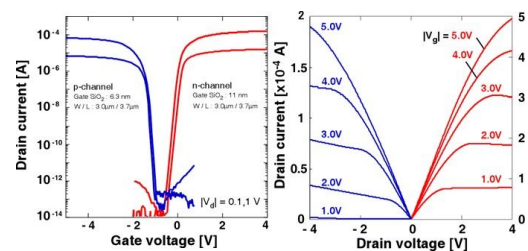


図4. PET 上の作製した単結晶シリコン MOSFET の Id-Vg および Id-Vd 特性。

PET 上での論理回路動作実証を目指して nMOS インバータ試作をおこなった。熱伝導率の低いプラスチック上では自己発熱の課題があり動作周波数は 3MHz と低いものの、図 5 に示すように入力信号に対する明瞭な反転信号が得られた。

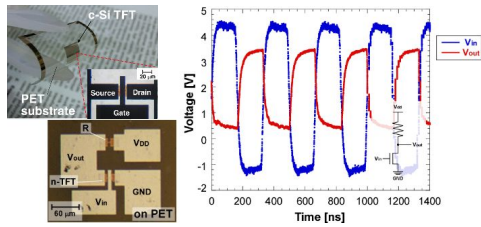


図5 . PET 上の nMOS インバータの光学顕微鏡写真と入出力信号 .

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. M. Akazawa, K. Sakaike, and S. Higashi, "Formation of silicon-on-insulator layer with midair cavity for meniscus force-mediated layer transfer and high-performance transistor fabrication on glass," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54** (2015) 086503-1. doi:10.7567/JJAP.54.086503.
2. K. Sakaike, M. Akazawa, A. Nakagawa and S. Higashi, "Meniscus-force-mediated layer transfer technique using single-crystalline silicon films with midair cavity: Application to fabrication of CMOS transistors on plastic substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54** (2015) 04DA08-1. DOI:10.7567/JJAP.54.04DA08.

[学会発表] (計 15 件)

1. R. Mizukami, S. Takeshima, T. Yamashita, and S. Higashi, "Improvement of Transfer Yield of Single-Crystalline Silicon Films and Fabrication of Thin-Film Transistors and Inverters on Plastic Substrate," *Ext. Abs. Int. Workshop Nanodevice Technologies 2017 (IWNT2017)*, (Higashi-Hiroshima, Japan, Mar. 2, 2017), pp. 44-45.
2. S. Takeshima, R. Mizukami, T. Yamashita, and S. Higashi, "Miniaturization of Single Crystalline Silicon Layer Transferred to Flexible Substrate by Meniscus Force Mediated Layer Transfer Technique," *Ext. Abs. Int. Workshop Nanodevice Technologies 2017 (IWNT2017)*, (Higashi-Hiroshima, Japan, Mar. 2, 2017), pp. 46-47. 7.
3. R. Mizukami, S. Takeshima, T. Yamashita and S. Higashi, "Fabrication of single crystalline silicon thin film transistors and logic circuits on plastic substrate by meniscus force mediated layer transfer technique" 13th Int. Thin-Film Transistor Conf. 2017 (ITC2017), (Austin, TX, USA, Feb. 23-24, 2017), pp. 17-18.
4. R. Mizukami, S. Takeshima, T. Yamashita, and S. Higashi, "Improvement of transfer yield of single-crystalline silicon films and fabrication of thin-film transistors on polyethylene terephthalate substrate," *International Conference on Flexible and Printed Electronics (ICFPE2016)*, (Yamagata, Japan, Sept. 6-8, 2016), O12-4. p. 88.
5. M. Akazawa, S. Takeshima, A. Nakagawa, K. Hiramatsu and S. Higashi, "Formation of Single Crystalline Silicon with Midair Cavity for Meniscus Force-Mediated Local Layer Transfer and Fabrication of High-Performance MOSFETs on Insulator," *Ext. Abs. 2015 Int. Conf. Solid State Dev. Mat. (SSDM2015)*, (Sapporo, Japan, Sep. 27-30, 2015), PS-1-15.
6. S. Higashi, "Silicon CMOS on glass and plastic - Crystallization and layer transfer approaches -," *Semiconductor Tech. Ultra Large Scale Integrated Circuits and Thin Film Transistors V, (Lake Tahoe, California, USA, Jun. 14-18, 2015)*. **[Invited]**
7. M. Akazawa, K. Sakaike, S. Nakamura, S. Hayashi, S. Morisaki, and S. Higashi, "Fabrication of Single Crystalline Silicon Thin Film Transistor on Glass Substrate by Using Meniscus-Force-Mediated Local Layer Transfer Technique," *Ext. Abs. Int. Workshop Nanodevice Technologies 2015 (IWNT2015)*, (Higashi-Hiroshima, Japan, Mar. 3, 2015), pp. 54-55.
8. 水上 隆達、竹島 真治、山下 知徳、東 清一郎、"中空構造 SOI 層を用いた低温転写における転写歩留まり向上とプラスチック基板上での単結晶シリコン TFT と論理回路の作製"、第 64 回応用物理学会学術講演会 講演予稿集 14a-304-10 (2017.3.14-17、パシフィコ横浜)。
9. 水上 隆達、竹島 真治、山下 知徳、東 清一郎、"中空構造 SOI 層を用いた低温転写における転写歩留まり向上とフレキシブル基板上での単結晶シリコン TFT と論理回路の作製"、薄膜材料デバイス研究会 第 13 回研究集会、

- 22a-003 (pp. 120-123)
(2016.10.21-10.22、龍谷大学 響都
ホール 校友会館).
10. 竹島 真治、水上 隆達、山下 知徳、
花房 宏明、東 清一郎、"中空構造
SOI 層を用いたフレキシブル基板への
転写技術におけるパターン微小化"、薄
膜材料デバイス研究会 第 13 回研究
集会、22p-P02 (pp.133-135)
(2016.10.21-10.22、龍谷大学 響都
ホール 校友会館).
 11. 水上 隆達、竹島 真治、山下 知徳、
東 清一郎、"中空構造 SOI 層を用い
た低温転写における転写歩留まり向上
とフレキシブル基板上での単結晶シリ
コン TFT とインバータ回路の作製"、
第 77 回応用物理学学会学術講演会 講
演予稿集 15a-B10-3 (2016.9.13-16、
朱鷺メッセ).
 12. 水上 隆達、中川 明俊、平松 和樹、
竹島 真治、山下 知徳、東 清一郎、
"中空構造 SOI 層を用いた低温転写技
術における PET 基板上高転写率の実
現"、第 63 回応用物理学学会学術講演会
講演予稿集 20p-S423-16
(2016.3.19-22、東工大 大岡山キャン
パス).
 13. 竹島 真治、酒池 耕平、赤澤 宗樹、
中川 明俊、東 清一郎、"中空構造
SOI 層の低温転写における FTIR-ATR を
用いたシリコン/PET 界面の化学結合
状態評価"、第 76 回応用物理学学会学術
講演会 講演予稿集 13a-1C-7
(2015.9.13-16、名古屋国際会議場).
 14. 赤澤 宗樹、東 清一郎、"メニスカス
力を用いた局所転写のための中空構造
単結晶シリコンの形成"、第 76 回応用
物理学学会学術講演会 講演予稿集
13a-1C-8 (2015.9.13-16、名古屋国際
会議場).
 15. 竹島 真治、酒池 耕平、赤澤 宗樹、
東 清一郎、"中空構造 SOI 層の低温転
写におけるシリコン/PET 界面の化学
結合状態評価"、2015 年度 応用物
理・物理系学会中国四国支部 合同学
術講演会 (Da-10) P.55. (2015.8.1、
徳島大学 常三島キャンパス).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：

国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東 清一郎 (HIGASHI, Seiichiro)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・教
授
研究者番号：30363047

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()